

УДК 004.432 + 528.2/.3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ РАЗЛИЧНЫХ НАУК О ЗЕМЛЕ

*канд. техн. наук. Г.А. ШАРОГЛАЗОВА, магистрант П.С. ДОЛГИЙ  
(Полоцкий государственный университет, Беларусь)*

Как известно, исследование геодинамических процессов требует комплексного подхода не только различных наук о Земле (геодезии, геофизики, геологии, геоморфологии, астрономии, сейсмологии и т.д.), но и учета космических влияний, например, солнечной активности или взаимодействия планеты Земля с другими планетами солнечной системы через геофизические поля. В то же время, занимающаяся исследованиями этих процессов геодинамика как научная дисциплина появилась сравнительно недавно, примерно с середины XX столетия, когда представители различных наук о Земле уже ясно понимали необходимость комплексного подхода, но сложность проблемы и недостаток экспериментального материала привели к тому, что на первоначальном этапе накопления данных исследователи всех перечисленных наук нашли свою нишу в изучении геодинамических процессов и действовали в общем-то отдельно друг от друга: геодезисты получали количественные характеристики деформаций земной коры, геофизики – вариации гравитационного и магнитного полей Земли, сейсмологи – информацию о сейсмичности и напряжениях в недрах Земли и т.д. Однако, интерпретируя свои данные, каждый из исследователей неизбежно сталкивался с тем, что многогранность проявления геодинамических процессов обусловлена их сложным единством, взаимосвязанностью геофизических полей не только между собой, но и с деформациями земной коры, сейсмичностью, глубинными геолого-тектоническими явлениями в недрах Земли, активностью Солнца, климатическими изменениями, то есть с необходимостью соединить на этапе интерпретации результаты геодинамических исследований различных наук о Земле.

К концу прошлого века во многих странах мира, включая и Беларусь, накопился значительный объем разнородных данных геодинамических исследований: геодезических, геолого-геофизических, сейсмологических, гидрологических, метеорологических и т.д., что позволило приступить к установлению возможных закономерностей проявления деформационных процессов: их математическому моделированию, проверке существующих геологических моделей или созданию новых. В науках о Земле было сделано такое важное теоретическое открытие [1, 2] как установление блочно-иерархической структуры земных недр, когда горные массивы и земная кора в целом делятся на макро, мезо и микроблоки, геодинамические процессы в которых, выражающиеся, например, в деформациях, протекают непрерывно, но с различной скоростью: в макро – медленнее, а в мезо и микро – быстрее. Это открытие стало активно использоваться в геомеханике и геодинамике [3].

Появилась возможность проверки результатов геодинамических исследований одной науки аналогичными данными другой науки. Так рассчитанные по сейсмограммам сеймотектонические деформации (СТД) с определением компонентов деформации в соответствии с теорией упругости (направление главных осей напряжений или деформаций, сдвиг, дилатация) для участков земной коры, подверженных воздействию землетрясения, оказалось возможным сопоставить с аналогичными характери-

стиками деформаций земной коры, найденными по результатам геодезических измерений согласно [4, 5]. Такое сравнение представлено в статье [6], где по данным сейсмической сети KNET за 1994–2006 гг. проведен расчет сеймотектонических деформаций земной коры Северного Тянь-Шаня (скорости дилатации и скорости деформации сдвига), которые сопоставлены с одноименными деформационными характеристиками, найденными авторами этой же статьи по результатам геодезических спутниковых GPS наблюдений. Аналогичные данные для территории Монголии приведены в [7].

В работе [8] выполнен анализ модели взаимодействия Евразийской и Тихоокеанской тектонических плит по трем видам экспериментальных данных: 1-результатам наземных линейно-угловых измерений на Карымском, Петропавловск-Камчатском и Шипунском геодинимических полигонах (ГДП) полуострова Камчатка, расположенном на стыке двух плит; 2- палеомагнитным данным; 3 - результатам космических измерений. Сделан вывод, что все три вида экспериментальных данных свидетельствуют в пользу гипотезы тектоники плит и непрерывного расширения океанического дна.

Приведенные примеры показывают, что геодинимика как наука стремительно развивается. Моделирование геодинимических процессов выполняется повсеместно, хотя это очень сложная проблема, так как речь идет о моделировании физических явлений, обычно приводящих к решению некорректных математических задач [9-11]. Известные геодинимические модели (модель тектоники плит; карта скоростей современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК) [12] как линейная модель площадного распространения скоростей движений земной коры; модели развития СВДЗК, основанные на алгоритме Христового [13]; модель кусочно-однородного деформирования земной поверхности [4], базирующаяся на теории упругости, получены с привлечением экспериментальных данных, но и при определенных теоретических допущениях. Современные информационные и инструментальные возможности, получение новых экспериментальных данных позволяют проверить существующие модели, предложить алгоритмы к их усовершенствованию, а также разработать наиболее наглядные формы представления с применением технологий и программного обеспечения ГИС.

Так в результате внедрения в геодезическую практику спутниковых технологий оказалось возможным существенно расширить площадной охват участков земной коры для организации на них геодинимического мониторинга за деформациями земной коры. Спутниковыми методами создана IGS (International geodynamics system) сеть, охватывающая в режиме мониторинга практически всю территорию земного шара, данные которого не только подтвердили гипотезу тектоники плит, но и позволили приступить к созданию динамической модели этой тектонической гипотезы в пространственно-временном аспекте.

В экспериментальной части настоящей работы продолжено исследование пространственно-временных моделей деформаций земной коры на локальном участке Полоцко-Курземского пояса тектонических разломов, составленных по 11 циклам высокоточного нивелирования, выполненного с 2004 по 2015 г. [14, 15]. При этом модель развития вертикальных деформаций в пространстве взята в виде тригонометрического ряда Фурье с заданным периодом (формула 1), а во времени – в виде степенного ряда (формулы 2–4).

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \frac{\pi x_i}{l} + b_1 \sin \frac{\pi x_i}{l} + a_2 \cos \frac{2\pi x_i}{l} + b_2 \sin \frac{2\pi x_i}{l} \quad (1)$$

где  $l$  – период.

Для определения неизвестных коэффициентов  $a_0, a_1, b_1, a_2, b_2$  в формуле (1) давались экспериментальные данные в виде средних скоростей вертикальных движений нивелирных знаков по профилю, выраженных в мм/год, за период 2004-2015 гг.

Развитие вертикальных деформаций во времени исследовалось на 3-х моделях:

- 1) Линейная аппроксимация

$$H_k^i = H_k^0 + V_k (T_i - T_0) \quad (2)$$

- 2) Квадратичная аппроксимация

$$H_k^i = H_k^0 + V_k (T_i - T_0) + A_k (T_i - T_0)^2 \quad (3)$$

- 3) Кубическая аппроксимация

$$H_k^i = H_k^0 + V_k (T_i - T_0) + A_k (T_i - T_0)^2 + B_k (T_i - T_0)^3 \quad (4)$$

В уравнениях (2- 4)  $V_k, A_k, B_k$  – коэффициенты аппроксимирующих уравнений;  $k$  – номер репера.

$T_i$  - эпохи нивелирования (2004, 6,7,8,9,10,11,12,13,15),

$T_0$  - начальная эпоха (2003 г.), к которой приводятся результаты нивелирования.

Для оценки точности моделей вычислена средняя квадратическая ошибка  $m$  по формуле Гаусса, так как измеренная отметка репера в данном случае принята за ее истинное значение.

$$m_{\text{модели}} = \sqrt{\frac{(H_k^{\text{выч.}} - H_k^{\text{изм.}})^2}{N}} \quad (5)$$

где  $N$  – общее число разностей.

Создано соответствующее программное обеспечение на языке PYTHON, которое может быть успешно применено и для любых других участков земной коры.

### Литература

1. О свойстве дискретности горных пород / М.А. Садовский [и др.] // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1982. – № 12.
2. Садовский, М.А. Дискретные иерархические модели геофизической среды / М.А. Садовский, В.Ф. Писаренко // Комплексные исследования по физике Земли. – М. : Наука, 1989. – С. 68–87.
3. Физическая мезомеханика / Ци Чэнчжи [и др.]. – 96 (2006). – С. 29–36.
4. Есиков, Н.П. Тектонофизические аспекты анализа современных движений земной поверхности / Н.П. Есиков. – М. : Наука, 1979. – 152 с.
5. Изучение полей деформации земной коры методом конечных элементов / В.А. Шульман [и др.] // Геодезия и картография. – 1979. – № 5. – С. 13–19.

6. Деформации земной коры по данным очагов землетрясений и космической геодезии / А.Д. Костик [и др.] // Физика земли. – 2010. – № 3. – С. 52–65.
7. Механизмы очагов землетрясений и поле напряжений монголии и прилегающих территорий / Н.А. Радзиминович [и др.] // Геодинамика и тектонофизика. – 2016. – 7(1). – С. 23–38.
8. Коровкин, В.Н. Анализ гипотезы тектоники плит по результатам геодезических измерений и данных других наук о Земле / В.Н. Коровкин, Г.А. Шароглазова, В.А. Парфененко // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2009. – № 9. – С. 109–115.
9. Панкрушин, В.К. Математическое моделирование и идентификация геодинамических систем / В.К. Панкрушин. – Новосибирск, СГГА, 2002. – 424 с.
10. Мазуров, Б.Т. Моделирование геодезических и гравитационных параметров при изучении геодинамических процессов / Б.Т. Мазуров. – Новосибирск, СГГА, 2014. – 242 с.
11. Кафтан, В.И. Временной анализ геопространственных данных: кинематические модели : дис. ... д-ра техн. наук / Кафтан В.И. – М., 2003. – 284 с.
12. Карта современных вертикальных движений земной коры СССР. – М. : ГУГК СССР, 1988.
13. Hristov, W.K. Gemeinsame Ausgleichung von Hohen und Vertikalgeschwindigkeiten eines Nivellierungsnetzes /, W.K. Hristov. – Acta Geodaet., Geophys. Et Montanist., Acad. Sci. Hung. Tomus 9(1-2), 1974. – h. 147–151.
14. Инструментальные исследования современной геодинамики в Полоцком регионе : отчет о НИР / Г.А. Шароглазова [и др.]. – Новополоцк : ПГУ. – 83 с.
15. Применение метода Христова к исследованию вертикальных движений земной коры / Г.А. Шароглазова [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Прикладные науки, строительство. – 2008. – № 12. – С. 99–105.